

6. ASTM F1188-00 (2000). Standard test method for interstitial atomic oxygen content of silicon by infrared absorption. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/F1188-00

7. ASTM F1391-93 (2000). Standard test method for substitutional atomic carbon content of silicon by infrared absorption. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/f1391-93r00

8. ASTM F1188 (2000). Standard practice for detection of oxidation induced defects in polished silicon wafers. ASTM International, West Conshohocken, PA.

9. ASTM F1809 (2000). Standard guide for selection and use of etching solutions to delineate structural defects in silicon. ASTM International, West Conshohocken, PA.

10. ASTM F1810 (2000). Standard test method for counting preferentially etched or decorated surface defects in silicon wafers. ASTM International, West Conshohocken, PA.

11. Taran, Ju. N., Kucova, V. Z., Chervonyj, I. F. et. al; Tarana, Ju. N. (Ed.) (2004). Poluprovodnikovyj kremnij: teorija i tehnologija proizvodstva. Zaporozh'e: ZGIA, 344.

12. Rekov, Ju. V., Chervonyj, I. F., Shvec, E. Ja., Golovko, Ju. V. (2012). Influence of carbon atoms on formation of impurity complexes in silicon single crystals. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/5 (58), 24–27. Available at: http://jet.com.ua/images/stories/vipsat/pfm/24_27.pdf

Дата находження рукопису 20.10.2015

Червоний Іван Федорович, доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою, кафедра металургії кольорових металів, Запорозька державна інженерна академія, пр. Леніна 226, г. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail : rot44@yandex.ru

Бубинець Олександр Вадимович, кафедра металургії кольорових металів, Запорозька державна інженерна академія, пр. Леніна 226, г. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: rot44@yandex.ru

УДК 536.24:533.6.011

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.53141

ТЕПЛООБМІН ТА АЕРОДИНАМІКА ПАКЕТІВ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ З ЛУНКАМИ

© В. А. Кондратюк, Є. М. Письменний, О. М. Терех

Приведені результати експериментальних досліджень теплообміну і аеродинамічного опору поперечно-омиваних шахових пакетів плоскоовальних труб з лунками на плоских бічних поверхнях в діапазоні чисел Рейнольдса $1250 < Re_H < 13500$. Розглянуто три варіанти розміщення труб при однаковому мінімальному значенні поперечного кроку труб S_1 . Проведено порівняння експериментальних даних з теплообміну і аеродинамічного опору пакетів труб з лунками і без них

Ключові слова: теплообмін, аеродинамічний опір, інтенсифікація, плоскоовальна труба, шаховий пакет, лунка, порівняння

Experimental investigations of heat transfer and aerodynamic drag of staggered bundles of flat-oval tubes with dimples on the lateral surfaces in cross flow in the range of Reynolds numbers $1250 < Re_H < 13500$ are performed. Three variants of placing of tubes are considered at the similar minimum value of transversal pitch of tubes S_1 . Comparison of experimental data of heat transfer and aerodynamic drag for tube bundles with dimples and without them are performed

Keywords: heat transfer, aerodynamic drag, intensification, flat-oval tube, staggered bundles, dimple, comparison

1. Вступ

Важливим напрямом підвищення ефективності газотурбінних установок з простим регенеративним циклом є вдосконалення регенераторів-повітро-нагрівачів за рахунок збільшення ступеня регенерації теплоти і поліпшення їх теплоаеродинамічних характеристик. Цю проблему можна вирішити одночасно за допомогою двох заходів. Перший пов'язаний з використанням в конструкції теплообмінників поверхонь нагріву з плоскоовальних труб [1]. Заміна круглих труб на плоскоовальні дозволяє підвищити коефіцієнт теплопередачі в 1,3...1,8 разів при прийнятних втратах тиску в га-

зовому і повітряному трактах повітронагрівача. Другий пов'язаний з інтенсифікацією зовнішнього теплообміну за рахунок нанесення на поверхню труб різних турбулізаторів потоку, наприклад заглиблень у вигляді масиву лунок, внаслідок чого інтенсивність теплообміну може збільшитися на 30...70 % [2, 3].

З метою отримання даних про можливу інтенсифікацію теплообміну шляхом використання лунок, в НТУУ "КПІ" проведені експериментальні дослідження конвективного теплообміну і аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб з циліндричними лунками і без них.

2. Аналіз літературних джерел

Інтенсифікація вихрового теплообміну при обтіканні стінок каналів, покритих заглибленнями (лунками), вже кілька десятиліть є актуальною проблемою теплофізики [2, 4–7]. Теплова ефективність рельєфів з лунками, пов'язана з вихровою структурою їх обтікання та багато в чому залежить від геометричних розмірів лунок, їх взаємного розташування і режимних параметрів потоку. В той же час основна частина матеріалів опублікованих монографій і статей відноситься до інтенсифікації теплообміну в каналах.

Розробка сучасних, високоефективних, компактних трубчастих теплообмінних апаратів тісно зв'язана з пошуком нових інтенсифікованих теплообмінних поверхонь, тому особливий інтерес представляє, як сказано в [3], інтенсифікація теплообміну за рахунок нанесення на зовнішню поверхню труб масиву лунок різної форми. Цей тип інтенсифікаторів характеризується зростанням інтенсивності зовнішнього теплообміну круглих труб при помірному збільшенні аеродинамічного опору. Авторами роботи [3] отримано збільшення інтенсивності теплообміну на 35 % в першому ряді шахового пакету круглих труб, на поверхні яких нанесені сферичні лунки шахового компонування з відносною глибиною $h_L/d_L = 0,3$, при зростанні аеродинамічного опору пакета всього на 10 %. В [2] представлені дослідні дані з теплообміну при поперечному обтіканні круглої труби з заглибленнями різної форми. Найбільше зростання інтенсивності теплообміну в 1,7...1,78 рази (в порівнянні з трубами без заглиблень) отримані для несиметричних глибоких $h_L/d_L = 0,23$ та дрібних $h_L/d_L = 0,09$ заглиблень.

Тим не менше, проблема вибору раціональних та ефективних по тепловіддачі при мінімальному опорі рельєфів лунок нанесених на поверхні стінок каналів та труб далека від вирішення, особливо це стосується труб зручнообтічної форми.

4. Методика та об'єкт дослідження

Експериментальні дослідження теплообміну і аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб з лунковим покриттям бічних прямих стінок та без них (рис. 1, 2) виконані в аеродинамічній трубці розікненого типу прямокутного перетину за методиками, які детально викладені в [8, 9].

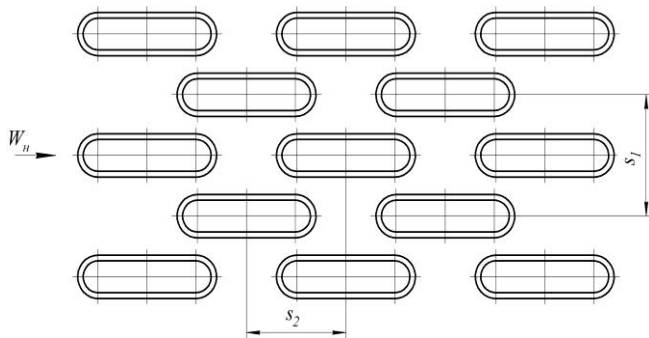


Рис. 1. Шаховий пакет з „щільним” розташуванням труб $d_2/d_1 = 3,4$; $s_1 = S_1/d_1 = 2,8$; $s_2 = S_2/d_1 = 2,43$

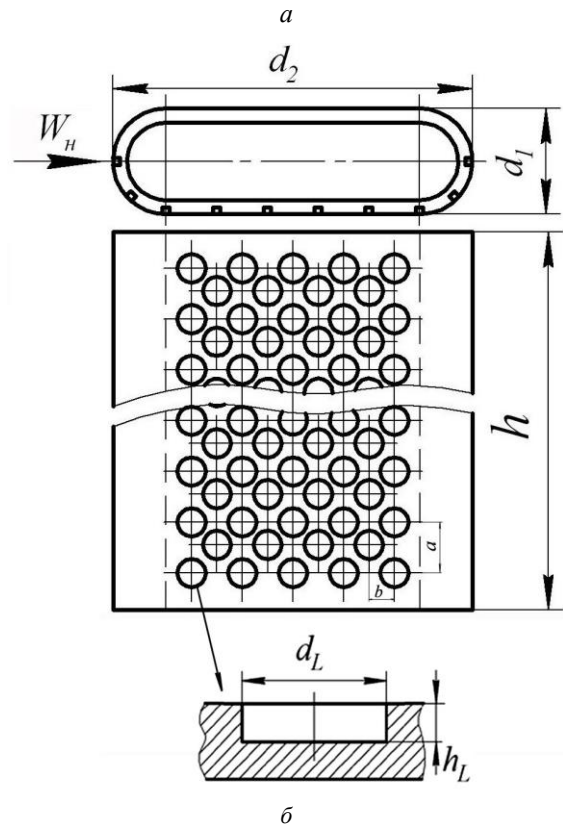
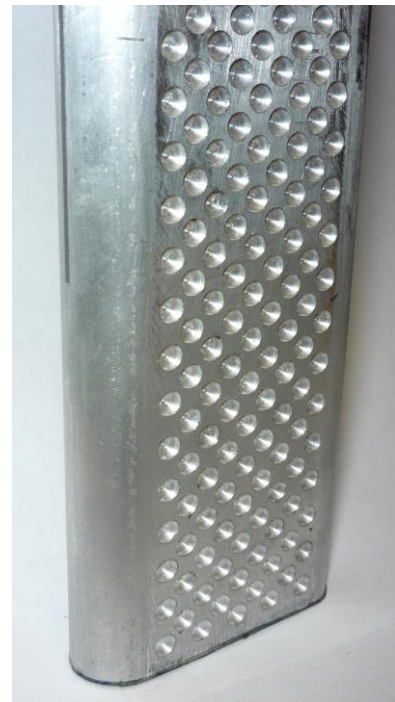


Рис. 2. Плоскоовальна труба з лунками: а – фотографія труби з лунками; б – конструкція труби з лунками

Для досліджень відібрані плоскоовальні труби з поперечним розміром труб $d_1 = 15$ мм і подовжнім $d_2 = 51$ мм ($d_2/d_1 = 3,4$) (рис. 2), які показали найвищу інтенсивність теплообміну в порівнянні з трубами іншого відношення d_2/d_1 ($d_2/d_1 = 2; 2,5; 5,0$) [10].

Масив циліндричних лунок діаметром $d_L = 4$ мм і глибиною $h_L = 1$ мм ($h_L/d_L = 0,25$) наносився на бічні поверхні труб за допомогою фрезерування (рис. 2). Лунки розташовувалися на поверхнях в шаховому

порядку з поперечним і подовжнім кроками, відповідно $a=7,2$ мм, $b=3,6$ мм ($a/b=2,0$). Коефіцієнт заповнення лунками бічної поверхні труб складає $K_{\text{зап}}=41,6$ %. Площа зовнішньої поверхні теплообміну за рахунок нанесення лунок збільшилася на 25 %. Геометричні характеристики лунок та їх розміщення на поверхні вибрані за рекомендаціями [11, 12].

Аналіз даних [10] показав, що найбільших значень коефіцієнта теплопередачі можна досягти при реалізації максимально щільних компоновань труб в пакетах. Мінімальні значення поперечного S_1 і повздовжнього S_2 кроків труб визначаються конструктивними і технологічними міркуваннями. Так, один з варіантів конструктивного виконання регенератора з труб, які мають $d_1=15$ мм і $d_2=51$ мм., розробленого в НТУУ «КПІ», дозволяє реалізувати компоновання з $S_1=42$ мм ($\sigma_1=S_1/d_1=2,8$) і $S_2=36,5$ мм ($\sigma_2=S_2/d_1=2,43$). При цьому мінімальні відстані між трубами в поперечному по відношенню до напрямку потоку теплоносія перетини досягають значення $(S_1 - 2d_1)/2=6$ мм, оскільки труби кожного поперечного ряду пакету частково розміщуються в міжтрубних проміжках сусідніх рядів (рис. 1).

Очевидно, що прискорення потоку в таких вузьких каналах приводить до „подавлення” турбулентності, що генерується в міжтрубному просторі внаслідок відривних процесів, що мають місце при поперечному обтіканні труб в пакетах. Тому виникає бажання „включити” фактор інтенсифікації теплообміну, який зв’язаний із застосуванням турбулізаторів на плоских бічних поверхнях труб пакету. При цьому складалася думка, що у випадку даного виду теплообмінників, коли дуже важливо додаткову інтенсифікацію теплообміну не супроводжувати істотним зростанням аеродинамічного опору в умовах течії у вузьких міжтрубних зазорах, можуть найкращим чином виявитися декларовані у великій кількості робіт власності „лункових” інтенсифікаторів.

Дослідження теплообміну і аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб проведені для трьох шестирядних пакетів з постійним поперечним кроком труб $\sigma_1=S_1/d_1=2,8$ та трьома різними повздовжніми кроками $\sigma_2=S_2/d_1=2,43; 3,0; 3,7$.

5. Результати досліджень

Дослідження теплообміну і аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб з „лунковим” покриттям та без них виконані в діапазоні чисел Рейнольдса $1150 < Re_H < 13500$, що відповідають швидкостям набігаючого потоку повітря $W_H=1,2...14$ м/с. Результати досліджень подані у логарифмічних координатах у вигляді залежностей $Nu = f(Re_H)$, $Eu = f(Re_H)$ на рис. 3, 4. Дослідні дані з тепловіддачі достатньо добре узагальнюються степеневу залежністю виду

$$Nu = C_q \cdot Re_H^m, \quad (1)$$

$$Eu = C_s \cdot Re_H^{-n}. \quad (2)$$

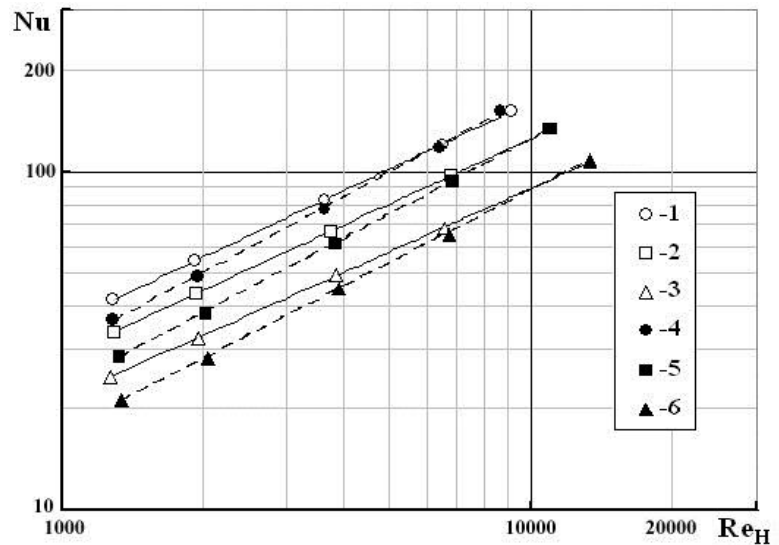


Рис. 3. Результати дослідження теплообміну пакетів плоскоовальних труб з $\sigma_1=S_1/d_1=2,8$: 1, 2, 3 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно, без лунок; 4, 5, 6 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно, з лунками

Фізичні константи, що входять у вирази для чисел Nu і Re відносилися до середньобалансової температури повітря, а за визначальний розмір приймалася величина d_1 . За розрахункову швидкість потоку прийнята швидкість у вільному поперечному перетині каналу робочої ділянки не зайнятого трубами пакету.

Представлені на рис. 3 результати показують, що щільний пакет ($\sigma_2=2,43$) труб має найбільшу інтенсивність теплообміну в порівнянні зі „звичайними” пакетами труб незалежно з лунковим покриттям труби чи без них. Інтенсивність теплообміну щільного пакету труб приблизно на 23 % більша ніж для пакета з $\sigma_2=3,0$ та на 65 % більша ніж для пакета з $\sigma_2=3,7$. Але, якщо подивитися на результати з аеродинамічного опору пакетів (рис. 4), бачимо, що опір щільного пакету труб набагато більший за аеродинамічний опір пакетів труб з $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ в 2 та 6,5 разів відповідно.

Порівняння представлених на рис. 3, 4 результатів проведених досліджень теплообміну і аеродинамічного опору пакетів труб свідчать, що покриття лунками бокових поверхонь плоскоовальних труб не приводять до інтенсифікації теплообміну для всіх розглянутих компоновань у всьому діапазоні чисел Рейнольдса.

Інтенсивність теплообміну пакетів з лунками для $Re_H < 10000$ нижче на 3...15 % в порівнянні з ідентичними пакетами труб без лункового „покриття” (рис. 5). При цьому аеродинамічний опір пакетів з лунками виявився на 13...18 % вищим, ніж для пакетів, що не мають лункового „покриття” в усьому діапазоні чисел Рейнольдса (рис. 6).

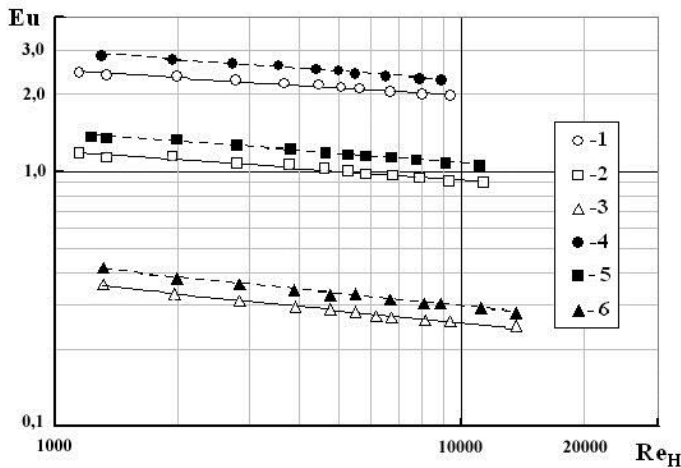


Рис. 4. Результати дослідження аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з $\sigma_1=S_1/d_1=2,8$: 1, 2, 3 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно, без лунок; 4, 5, 6 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно, з лунками

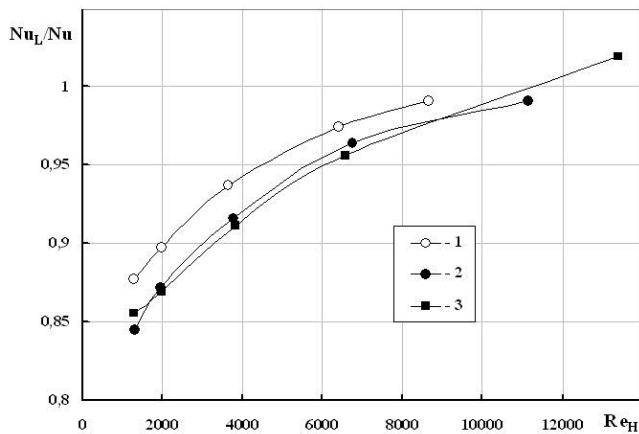


Рис. 5. Зіставлення даних з теплообміну пакетів плоскоовальних труб з лунками та без них при $\sigma_1=S_1/d_1=2,8$: 1, 2, 3 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно

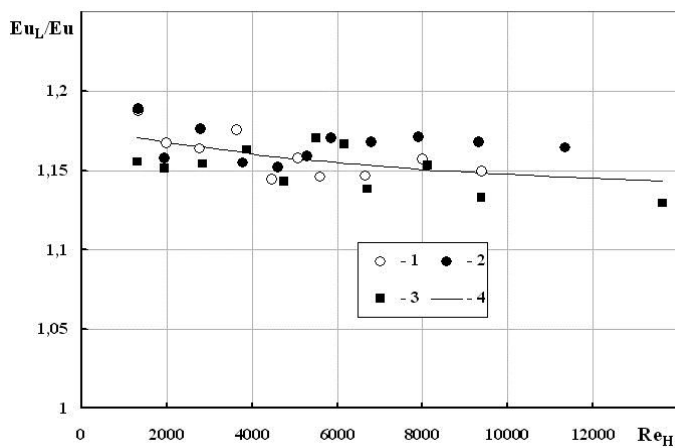


Рис. 6. Порівняння даних з аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб з лунками та без них при $\sigma_1=S_1/d_1=2,8$: 1, 2, 3 – $\sigma_2=2,43$, $\sigma_2=3,0$, $\sigma_2=3,7$ відповідно; 4 – усереднена крива

7. Висновки

Результати проведених досліджень дозволяють відзначити наступне: застосування інтенсификаторів у вигляді циліндричних лунок з реалізованими геометричними характеристиками не приводить в умо-

вах течії, які характерні для щільних пакетів труб, до інтенсифікації теплообміну і зниження аеродинамічного опору.

Література

1. Pis'mennyi, E. N. Ways for Improving the Tubular Heaters Used in Gas Turbine Units [Text] / E. N. Pis'mennyi // Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59, Issue 6. – P. 485–490. doi: 10.1134/s0040601512060080

2. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 7. Вихревые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук; Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев, 2008. – 292 с.

3. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамическое сопротивление при поперечном обтекании воздухом первого ряда пучка труб со сферическими углублениями [Текст] / А. А. Халатов, А. Ж. Мейрис, Т. В. Доник, А. В. Гамрецькая // Вісник НТУ „ХПІ”. – 2015. – № 16 (1125). – С. 50–53.

4. Алексеев, В. В. Смерчевой энергообмен на трехмерных вогнутых рельефах – структура самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей. Т. 6 [Текст]: тр. Второй Рос. нац. конф. / В. В. Алексеев, И. А. Гачечиладзе, Г. И. Кикнадзе, В. Г. Олейников. – Конференция по теплообмену. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. – М.: МЭИ, 1998. – С. 33–42.

5. Быстров, Ю. А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб [Текст] / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. – Санкт-Петербург: Судостроение, 2005. – 389 с.

6. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 5. Теплообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков [Текст] / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. В. Шевцов. – Киев: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

7. Гортышов, Ю. Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена [Текст] / Ю. Ф. Гортышов, И. А. Попов, В. В. Олимпиев, А. В. Щелчков, С. И. Каськов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.

8. Письменный, Е. Н. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоскоовальных труб [Текст] / Е. Н. Письменный, В. А. Кондратюк, Ю. В. Жукова, А. М. Терех // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 8 (50). – С. 4–8. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1829/1725>

9. Кондратюк, В. А. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб [Текст] / В. А. Кондратюк, В. Е. Туз, А. М. Терех, Ю. В. Жукова, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 8 (57). – С. 39–42. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4074/3740>

10. Кондратюк, В. А. Теплообмін шахових пакетів плоскоовальних труб в поперечному потоці [Текст] / В. А. Кондратюк, О. М. Терех, О. В. Баранюк, Є. М. Письменний // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 1, № 8 (73). – С. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2015.37318

11. Isaev, S. Vortex heat transfer enhancement in narrow channel by oval dimples arrangement [Text] / S. Isaev, Ja. Chudnovsky, A. Leontiev, N. Kornev, E. Hassel // Proceedings of the 2013 ASME Summer Heat Transfer Conference SHTC-2013. – Minneapolis, Minnesota, USA, 2013. – P. HT2013-17596. doi: 10.1115/ht2013-17596

12. Leontiev, A. Numerical modeling and physical simulation of vortex heat transfer enhancement mechanisms over dimpled relief [Text] / A. Leontiev, S. Isaev, N. Kornev, Ja. Chudnovsky, E. Hassel // Proceedings of the 14 Int. Heat Transfer Conf. IHTC 14. – Washington, DC, USA, 2010. – P. 419–428. doi: 10.1115/ihtc14-22334

References

1. Pis'mennyi, E. N. (2012). Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. *Thermal Engineering*, 59 (6), 485–490. doi: 10.1134/s0040601512060080

2. Khalatov, A. A., Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. (2008). Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces, Vol. 7. *Aerothermal vortex technologies for power engineering gas turbines*. Kyiv: Institute of technical thermalphysics NAN of Ukraine, 292.

3. Khalatov, A. A., Meyris, A. Zh., Donik, T. V., Hamretska, A. V. (2015). Heat transfer and hydrodynamic drag at the transversal air flowing around of the first row of tube bundles with spherical deepenings. *Visnyk NTU „KhPI”*, 16 (1125), 50–53.

4. Alekseev, V. V., Hachechylidze, I. A., Kiknadze, H. I., Oleinikov, V. H. (1998). Tornado power exchange on three-dimensional concave reliefs – self-organization structure of flows, their visualization and mechanisms of flowing around of surfaces. Vol. 6. *Labours of II Russian National Conference of Heat Transfer*. Moscow, Russia. Intensification of heat transfer. Radiation and difficult heat transfer. Moscow: MEI, 33–42.

5. Bystrov, U. A., Isaev, S. A., Kudriavtsev, A. I., Leontiev, A. I. (2005). Numerical design of vortical intensification of heat transfer in tube bundles. *Sankt-Petersburg: Shipbuilding*, 389.

6. Khalatov, A. A., Borisov I. I., Shevtsov S. V. (2005). Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Vol. 5. *Heat transfer and thermalhydraulic efficiency of vortical and involute streams*. Kyiv: Publ. house of Institute of technical thermalphysics NAN of Ukraine, 500.

7. Gortyshov, U. F., Popov, I. A., Olimpiev, V. V., Shchelchikov, A. V., Kaskov, S. I. (2009). *Heat hydraulic efficiency of perspective methods of heat transfer intensification in ductings of heat-exchange equipment*. Intensification of heat transfer. Kazan': Center of innovative technologies, 531.

8. Pis'menyi, E. N., Kondratyuk, V. A., Zhukova, Yu. V., Terekh, A. M. (2011). Heat transfer of staggered bundles of flat-oval tubes in cross flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/8 (50), 4–8. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1829/1725>

9. Kondratyuk, V. A., Tuz, V. E., Terekh, A. M., Zhukova, Yu. V., Meyris, A. J. (2012). Aerodynamic drag of transversal-streamlined staggered bundles of flat-oval tubes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/8 (57), 39–42. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4074/3740>

10. Kondratyuk, V. A., Terekh, A. M., Baranyuk, A. V., Pis'menyi, E. N. (2015). Heat transfer of staggered bundles of flat oval tube in transversal flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (73), 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2015.37318

11. Isaev, S., Chudnovsky, Ja., Leontiev, A., Kornev, N., Hassel, E. (2013). Vortex heat transfer enhancement in narrow channel by oval dimples arrangement. *Minneapolis, Minnesota, USA, HT2013-17596*. doi: 10.1115/ht2013-17596

12. Leontiev, A., Isaev, S., Kornev, N., Chudnovsky, Ja., Hassel, E. (2010). Numerical modeling and physical simulation of vortex heat transfer enhancement mechanisms over dimpled relief. *Washington, DC, USA, 419–428*. doi: 10.1115/ihtc14-22334

Дата надходження рукопису 14.10.2015

Кондратюк Вадим Анатолійович, асистент, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: KomandirVA@i.ua

Письменний Євген Миколайович, доктор технічних наук, професор, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: evgnik@i.com.ua

Терех Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: teram57@meta.ua